

19 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE
COURBEVOIE

11 N° de publication :
(à n'utiliser que pour les
commandes de reproduction)

3 077 392

21 N° d'enregistrement national : 18 50644

51 Int Cl⁸ : G 01 R 33/38 (2018.01), A 61 B 5/055, G 01 R 33/48

12

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

22 Date de dépôt : 26.01.18.

30 Priorité :

43 Date de mise à la disposition du public de la
demande : 02.08.19 Bulletin 19/31.

56 Liste des documents cités dans le rapport de
recherche préliminaire : *Se reporter à la fin du
présent fascicule*

60 Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

○ Demande(s) d'extension :

71 Demandeur(s) : UNIVERSITE DE MONTPELLIER (UM) — FR, CENTRE
NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE — FR, CENTRE HOSPITALIER
ET UNIVERSITAIRE DE MONTPELLIER — FR, CENTRE DE COOPERATION
INTERNATIONALE EN RECHERCHE AGRONOMIQUE POUR LE DEVELOPPE-
MENT — FR, REINVENT SYSTEMS FOR SCIENCE & DISCOVERY (RS2D) — FR
et AXLR, SATT DU LANGUEDOC ROUSSILLON — FR.

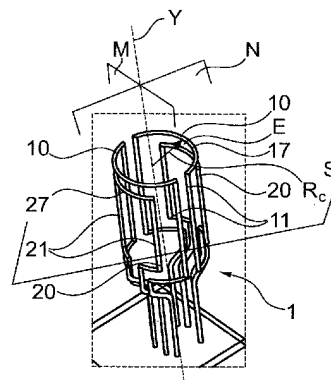
72 Inventeur(s) : COILLOT CHRISTOPHE, SIDIBOULENOUAR
RAHIMA, ZANCA MICHEL, DE PELLEGARS PAULINE, SCHIMPF
REMY, MULLER JULIEN, ALIBERT ERIC, NATIVEL ERIC, GOZE-
BAC CHRISTOPHE et VERDEIL JEAN-LUC.

73 Titulaire(s) : UNIVERSITE DE MONTPELLIER, CENTRE NATIONAL DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE, CENTRE HOSPITALIER ET UNIVERSITAIRE
DE MONTPELLIER, CENTRE DE COOPERATION INTERNATIONALE EN
RECHERCHE AGRONOMIQUE POUR LE DEVELOPPEMENT, REINVENT SYS-
TEMS FOR SCIENCE & DISCOVERY (RS2D), AXLR, SATT DU LANGUEDOC
ROUSSILLON.

74 Mandataire(s) : CABINET NONY.

54 SYSTEME DE BOBINES POUR UTILISATION EN RESONANCE MAGNETIQUE NUCLEAIRE ET IMAGERIE
PAR RESONANCE MAGNETIQUE NUCLEAIRE.

57 Dispositif de résonance magnétique nucléaire ou
d'imagerie par résonance magnétique, comportant un sys-
tème de bobines (1) comportant N paires de bobines (10,
20), où N est un entier supérieur à 1, ces bobines (10, 20)
s'étendant au moins partiellement selon une surface enve-
loppe (E) du système de bobines à symétrie de révolution,
chaque bobine (10, 20) comportant au moins deux portions
opposées (11, 21) définissant un plan associé (P1, P2) pa-
rallèle à un premier plan médian (M) de la surface enve-
loppe (E) contenant un axe de symétrie (Y) de la surface
enveloppe (E), les portions opposées (11, 21) des bobines
(10, 20) d'une même paire étant disposées de manière sy-
métrique par rapport au premier plan médian (M), les por-
tions opposées (11, 21) d'une bobine (10, 20) étant
disposées de manière symétrique par rapport à un deu-
xième plan médian (N) contenant ledit axe de symétrie (Y)
et perpendiculaire au premier plan médian (M).



FR 3 077 392 - A1



SYSTEME DE BOBINES POUR UTILISATION EN RESONANCE MAGNETIQUE NUCLEAIRE ET IMAGERIE PAR RESONANCE MAGNETIQUE NUCLEAIRE

La présente invention concerne les systèmes de bobines et leurs utilisations dans des procédés d'imagerie et/ou de spectrométrie par résonance magnétique nucléaire (RMN).

5 La RMN requiert une source de champ magnétique statique homogène pour la polarisation des spins combinée à une source de champ magnétique alternatif à la fréquence de résonance gyromagnétique d'un noyau d'un échantillon à observer pour l'excitation et/ou la détection des spins de celui-ci. Ces sources sont couramment réalisées au moyen de bobines.

10 Dans un champ magnétique statique B_0 , les spins d'un noyau atomique précessent à la fréquence de Larmor (ω_0) selon $\omega_0 = \gamma B_0$, où γ est le rapport gyromagnétique et B_0 l'intensité du champ magnétique statique.

Le phénomène de résonance magnétique est classiquement observé au moyen d'une sonde prenant la forme d'une bobine (coil), c'est-à-dire un circuit électrique fermé qui
15 est le siège d'une tension induite. Pour produire le champ radiofréquence (RF) et/ou capter le signal de RF, les bobines sont accordées pour correspondre à la fréquence de résonance de précession du noyau atomique à mesurer, en général du proton, qui se trouve dans le champ magnétique statique B_0 et adaptée à l'impédance d'entrée de l'amplificateur de puissance (standard de 50 Ohms), de façon à optimiser le transfert de puissance.

20 La sonde doit avoir la caractéristique de produire un champ magnétique homogène dans un volume d'intérêt le plus grand possible et présenter un rapport signal à bruit élevé, ce qui se traduira soit en réduction du temps d'acquisition soit en amélioration de la résolution pour un temps d'acquisition donné. Le rapport signal à bruit des bobines impacte directement la performance de l'acquisition tandis que leur homogénéité en champ
25 magnétique sur le volume d'intérêt conditionne l'homogénéité de l'image IRM.

Pour satisfaire ce besoin, une grande variété de sondes a été développée pour l'observation du signal RMN: bobines Helmholtz, bobines selle, bobines « birdcage », bobine Bolinger ou encore millipède.

Les bobines dites en cage d'oiseau ou « *birdcage* », divulguées par Hayes et al.
30 dans l'article « *An Efficient, Highly Homogeneous Radio frequency Coil for Whole-Body NMR Imaging at 1.5T* » (1985), et les bobines millipède, utilisent un déphasage spatio-temporel pour favoriser une répartition cosinusoidale de la distribution de la densité de

courant à la fréquence d'observation du signal RMN (i.e. la fréquence de précession gyromagnétique).

Les autres bobines exploitent une position adéquate des conducteurs formant les bobines pour se rapprocher de la distribution cosinusoidale. Une solution, par exemple
 5 proposée dans l'article de Bolinger et al. « *A Multiple-Frequency Coil with a Highly Uniform B_1 Field* » (1988), l'article « *Bobine pour la production de champs magnétiques à homogénéité élevée ou très élevée* » (1978) de Krueger et l'article « *High Frequency Coil* » (1990) de Fujita, utilise la disposition de brins ou bobines en parallèle pour favoriser l'homogénéité. Dans le cas de la bobine de Bolinger, celle-ci possède plusieurs brins, chacun
 10 étant disposé de façon à ce que les projections de ces brins sur le diamètre (cf. Figure 1) soient à égales distances.

Toutefois, ces solutions concernent des géométries cylindriques de type « *saddle-coil* » telles que divulguées dans l'article « *The Signal-to-Noise-Ratio of the Nuclear Magnetic Resonance Experiment* » et les bobines sont utilisées à des fréquences
 15 telles que la longueur des fils conducteurs reste bien en deçà de la longueur d'onde.

L'invention vise à proposer des solutions de bobinage applicables tant aux géométries de révolution, par exemple cylindrique, qu'aux géométries de révolution sphérique, pour produire un champ magnétique homogène à la fois en statique et à haute fréquence, notamment à des fréquences pour lesquelles les phénomènes propagatifs ne sont
 20 plus négligeables, i.e. où les longueurs des conducteurs ne sont plus négligeables devant la longueur d'onde.

L'invention a ainsi pour objet un dispositif de résonance magnétique nucléaire (RMN) ou d'imagerie par résonance magnétique (IRM), comportant un système de bobines comportant N paires de bobines, où N est un entier supérieur à 1, de préférence supérieur à
 25 2, ces bobines s'étendant, au moins partiellement, selon une surface enveloppe du système de bobines, la surface enveloppe étant à symétrie de révolution, notamment sphérique, cylindrique, conique ou ellipsoïdale, chaque bobine comportant au moins deux portions opposées définissant un plan associé parallèle à un premier plan médian de la surface enveloppe contenant un axe de symétrie de la surface enveloppe, les portions opposées des
 30 bobines d'une même paire étant disposées de manière symétrique par rapport au premier plan médian, les portions opposées d'une bobine étant disposées de manière symétrique par

rapport à un deuxième plan médian contenant ledit axe de symétrie et perpendiculaire au premier plan médian,

système dans lequel lorsqu'observées en coupe dans un plan de symétrie de la surface enveloppe perpendiculaire audit axe de symétrie, les portions opposées des bobines sont disposées suivant un cercle,

système dans lequel la disposition des bobines satisfait aux relations suivantes :

a) dans le cas où le système comporte un nombre impair de bobines avec une bobine centrale s'étendant suivant le premier plan médian

$$I_0 + \sum_{p=1}^N (I_p \cos(3\theta_p)) = 0 \quad (k = 2)$$

...

$$I_0 + \sum_{p=1}^N (I_p \cos((2j-1)\theta_p)) = 0 \quad (k = j) \quad (\text{Eq. 1})$$

...

$$I_0 + \sum_{p=1}^N (I_p \cos((4N+1)\theta_p)) = 0 \quad (k = 2N+1)$$

où θ_p est l'angle, sur le cercle, entre l'une des portions opposées d'une bobine de la $p^{\text{ième}}$ paire de bobines et l'une des intersections du premier plan médian avec le cercle, p étant un entier entre 1 et N , $I_p = N_p i_p$ étant le produit du nombre de spires N_p des bobines de la $p^{\text{ième}}$ paire de bobines et de l'amplitude du courant i_p parcourant ces bobines, par exemple le produit du nombre de spires N_p d'une bobine de la $p^{\text{ème}}$ paire de bobines et de l'amplitude de l'intensité i_p du courant parcourant ces bobines, produit aussi appelé « *spires-courants* » ci-après, et I_0 étant le produit du nombre de spires de la bobine centrale et de l'amplitude du courant parcourant la bobine centrale,

b) dans le cas où le système comporte un nombre pair de bobines,

$$\sum_{p=1}^N (I_p \cos(3\theta_p)) = 0 \quad (k = 2)$$

...

$$\sum_{p=1}^N (I_p \cos((2j-1)\theta_p)) = 0 \quad (k = j) \quad (\text{Eq. 2})$$

...

$$\sum_{p=1}^N (I_p \cos((4N-1)\theta_p)) = 0 \quad (k = 2N),$$

où θ_p est l'angle, sur le cercle, entre l'une des portions opposées d'une bobine de la $p^{\text{ième}}$ paire de bobines et l'une des intersections du premier plan médian avec le cercle, p étant

un entier compris entre 1 et N, I_p étant le produit du nombre de spires des bobines de la $p^{\text{ième}}$ paire de bobines et de l'amplitude du courant parcourant ces bobines, par exemple le produit du nombre de spires N_p d'une bobine de la $p^{\text{ème}}$ paire de bobines et de l'amplitude de l'intensité i_p du courant parcourant ces bobines.

5 L'invention présente l'avantage d'une facilité de réalisation ainsi que des gains en performance, à la fois au niveau de la sensibilité des bobines et en homogénéité du champ magnétique produit.

10 La disposition des bobines selon l'invention permet d'annuler les $2N-1$ (dans le cas d'un nombre impair de bobines avec N paires de bobines symétriques) ou $2N$ (dans le cas d'un nombre pair de bobines avec N paires de bobines symétriques et une bobine centrale) harmoniques spatiaux de la distribution de densité de courant. Les variables des Equations 1 et 2 sont les N angles θ_p et les N produits « spires-courants » I_p .

Les différentes variables peuvent aisément être fixées par l'utilisateur pour satisfaire à des contraintes propres à l'application ou à la mise en œuvre.

15 Les bobines peuvent être alimentées avec des courants de même amplitude. De préférence, les bobines sont alimentées avec des courants de même intensité en amplitude efficace. C'est notamment le cas lorsque les spires sont en série et que les courants dans les bobines sont tous égaux. Dans la présente invention, l'amplitude est l'amplitude efficace.

20 De préférence, deux bobines d'une même paire de bobines comportent le même nombre de spires. Par exemple, toutes les bobines comportent un même nombre de spires

Chaque bobine peut comporter des portions opposées s'étendant suivant une surface enveloppe sphérique, les bobines étant de préférence des bobines circulaires.

25 Dans une variante, chaque bobine comporte deux portions opposées rectilignes s'étendant suivant une surface enveloppe cylindrique et parallèle à son axe et au moins une portion courbe reliant les portions opposées.

Les bobines peuvent être reliées en série ou en parallèle. Dans le cas de bobines associées en parallèle à basse fréquence, telle qu'inférieure à 30MHz (gamme standardisée HF), les courants dans les bobines peuvent satisfaire l'expression $Z_n i_n = Z_i i_i$, où Z_i et Z_n sont respectivement l'impédance d'une bobine de la $i^{\text{ième}}$ paire de bobines et de la $n^{\text{ième}}$ paire de bobines, i et n étant des nombres entiers quelconques entre 1 et N.

Les bobines peuvent être mono-spires. Dans une variante, les bobines sont multi-spires.

Le dispositif peut être utilisé en régime statique. Dans ce cas, les courants dans les bobines sont continus.

Lorsque la surface enveloppe est à symétrie sphérique, les angles θ_p et les « spires-courant » I_p sont de préférence solution de l'équation

$$5 \quad \frac{\mu_0}{R} \sum_{p=1}^N I_p \cos^2(\theta_p) = B_{obj} \quad Eq(3)$$

où R est le rayon de la surface enveloppe sphérique, μ_0 est la perméabilité magnétique du vide et B_{obj} est l'amplitude du champ magnétique à générer.

Le jeu d'équation complet à résoudre est alors le suivant :

$\frac{\mu_0}{R} (I_0 + \sum_{p=1}^N I_p \cos^2(\theta_p)) = B_{obj}$ <p style="text-align: center;">(k = 1)</p> $I_0 + \sum_{p=1}^N I_p (\cos(3\theta_p)) = 0$ <p style="text-align: center;">(k = 2)</p> $I_0 + \sum_{p=1}^N I_p (\cos((2j-1)\theta_p)) = 0$ <p style="text-align: center;">(k = j)</p> $I_0 + \sum_{p=1}^N I_p (\cos((4N+1)\theta_p)) = 0$ <p style="text-align: center;">(k = 2N + 1)</p> <p style="text-align: center;">Eq. (1bis): cas impair</p>	$\frac{\mu_0}{R} (\sum_{p=1}^N I_p \cos^2(\theta_p)) = B_{obj}$ <p style="text-align: center;">(k = 1)</p> $\sum_{p=1}^N I_p (\cos(3\theta_p)) = 0$ <p style="text-align: center;">(k = 2)</p> $\sum_{p=1}^N I_p (\cos((2j-1)\theta_p)) = 0$ <p style="text-align: center;">(k = j)</p> $\sum_{p=1}^N I_p (\cos((4N-1)\theta_p)) = 0$ <p style="text-align: center;">(k = 2N)</p> <p style="text-align: center;">Eq. (2bis): cas pair</p>
--	--

10 Les solutions des 2 jeux d'équations qui précèdent n'étant pas nécessairement uniques, le choix de la solution optimale sera conditionné par la minimisation des pertes par effet Joule.

15 Le dispositif peut également être configuré pour être utilisé comme sonde RMN ou IRM. Dans le cas où toutes les bobines comportent un même nombre de spires, les angles θ_n étant de préférence choisis de manière à maximiser l'expression $\sum_{p=1}^N I_p \cos^2(\theta_p)$. Cela permet de maximiser la sensibilité du système de bobines S_{coil} , définie par B/I , où B/I est le champ magnétique d'excitation des spins par unité de courant, tel que défini par « *The signal-to-noise ratio of the nuclear magnetic resonance experiment* » by Hoult *et al.* (1976).

Dans le cas où toutes les bobines sont en série, la sensibilité S_{coil} est proportionnelle à $\sum_{p=1}^N N_p \cos^2(\theta_p)$. Dans le cas où toutes les bobines sont en parallèle la sensibilité S_{coil} est proportionnelle à $\frac{\sum_{p=1}^N N_p i_p \cos^2(\theta_p)}{\sum_{p=1}^N i_p}$.

De préférence, la sensibilité est maximisée. Pour cela, il faudra associer à la résolution du jeu d'équations d'annulation des harmoniques, la maximisation de la sensibilité S_{coil} (comme explicité par les jeux d'équation Eq. (1ter) et Eq. (2ter)) et ainsi favoriser le rapport signal à bruit.

$\text{Max}(I_0 + \sum_{p=1}^N I_p \cos^2(\theta_p))$ $(k = 1)$ $I_0 + \sum_{p=1}^N I_p (\cos(3\theta_p)) = 0$ $(k = 2)$ $I_0 + \sum_{p=1}^N I_p (\cos((2j-1)\theta_p)) = 0$ $(k = j)$ $I_0 + \sum_{p=1}^N I_p (\cos((4N+1)\theta_p)) = 0$ $(k = 2N+1)$	$\text{Max}(\sum_{p=1}^N I_p \cos^2(\theta_p))$ $(k = 1)$ $\sum_{p=1}^N I_p (\cos(3\theta_p)) = 0$ $(k = 2)$ $\sum_{p=1}^N I_p (\cos((2j-1)\theta_p)) = 0$ $(k = j)$ $\sum_{p=1}^N I_p (\cos((4N-1)\theta_p)) = 0$ $(k = 2N)$
Eq. (1ter): cas impair	Eq. (2ter): cas pair

Le dispositif peut être configuré pour être utilisé comme sonde d'excitation des spins et/ou détection des spins à basse fréquence. Par basse fréquence, il faut comprendre que les longueurs des fils sont inférieures à une fraction de la longueur d'onde, par exemple 1/8, voire 1/10, de la longueur d'onde à la fréquence de résonance gyromagnétique, i.e. la longueur d'onde d'un signal RMN à détecter, comme indiqué par Mispelter et al., page 103 de son ouvrage « *NMR probeheads for biophysical and medical experiments* ». La fréquence d'une sonde en basse fréquence appartient aux gammes de fréquences du quasi-continu à 30MHz (gamme standardisée HF).

Le dispositif peut être configuré pour être utilisé comme sonde RMN ou IRM en haute fréquence, par exemple supérieure à 30MHz. Dans ce cas, le système de bobines est de préférence divisé, le long de la longueur du et des fils conducteurs constituant les bobines, en une pluralité de segments, ces segments étant reliés entre eux par des condensateurs de

segmentation de façon à ce que la fréquence de résonance globale du système coïncide avec la fréquence de résonance de précession gyromagnétique du noyau à observer. La fréquence de résonance globale ω_0 du système est égale à $1/\sqrt{LC_{sq}}$, où L est la valeur de l'inductance du système et C_{sq} est la capacité du condensateur équivalent à tous les condensateurs placés dans le circuit de la sonde. Dans le cas où tous les condensateurs de segmentation sont en série, la fréquence de résonance globale ω_0 du système est égale à $1/\sqrt{L \frac{C_s}{H_s}}$, où L est la valeur de l'inductance du système, C_s est la capacité des condensateurs de segmentation et H_s est le nombre total de condensateurs de segmentation. De préférence les longueurs des segments sont sensiblement identiques au sein d'une bobine, avec une tolérance de 10% au sein d'une bobine, sauf à ses extrémités. Cette longueur peut varier d'une bobine à une autre.

Lorsque la longueur de la boucle n'est plus négligeable devant la longueur d'onde, les phénomènes propagatifs ne sont plus négligeables et, d'après Mispelter et al, un déphasage du courant le long du conducteur apparaît, induisant des hétérogénéités de champ magnétique. Ainsi, la longueur d'un segment est de préférence inférieure ou égale à $\lambda/8$, voire inférieure ou égale à $\lambda/10$, où λ est la longueur d'onde du signal RMN à détecter, afin de pouvoir supposer un fonctionnement en approximation des régimes quasi-stationnaires (ARQS), dans lequel le temps de propagation des ondes électromagnétiques devant la période du signal peut être considéré comme négligeable.

Le système de bobines peut être associé à un amplificateur bas bruit haute impédance afin d'optimiser le rapport signal à bruit, comme il est montré par Resmer et al., dans l'article intitulé « *Cryogenic receive coil and low noise preamplifier for MRI at 0.01 T* » publié en 2010 dans Journal of Magnetic Resonance.

Le dispositif peut être configuré pour être utilisé comme sonde RMN ou IRM. Les bobines peuvent être associées à un circuit d'accord et d'adaptation (« *tuning-matching* »).

Le dispositif peut être configuré pour permettre l'introduction d'un échantillon, au moins partiellement, à l'intérieur du volume délimité par la surface enveloppe. Le dispositif peut comporter un support, ayant sensiblement la même forme que la surface enveloppe, sur lequel sont disposées les bobines, le support pouvant être ouvert, par exemple par déplacement relatif des différentes parties du support, notamment suivant un axe de celui-ci, afin de permettre l'introduction d'un échantillon à l'intérieur du support.

Le dispositif, en tant que sonde volumique, peut être associé à des sondes de surface, comme il est connu de la littérature sur le sujet. On peut notamment se référer au mémoire de thèse de Sonam Togbay (2004), intitulé « *Novel Concepts for RF Surface Coils with Integrated Receivers* ».

5 L'invention a encore pour objet une sonde RMN ou IRM comportant un dispositif selon l'invention.

L'invention a encore pour objet une sonde RMN ou IRM comportant des systèmes selon l'invention combinés en quadrature, comme il est connu pour les sondes volumiques depuis les travaux de Chen et al., rapportés dans l'article « *Quadrature detection coils – a Further $\sqrt{2}$ improvement in sensitivity* » publié en 1984 dans le Journal of Magnetic Resonance.

L'invention a encore pour objet une bobine pour sonde RMN ou IRM, comportant au moins un fil conducteur électrique et au moins un condensateur de segmentation, le fil conducteur étant divisé, le long de sa longueur, en une pluralité de segments par le ou les condensateurs de manière à ce que les longueurs de ces segments soient sensiblement identiques, le nombre de segments et la capacité des condensateurs étant choisis de façon à ce que la fréquence de résonance globale de la bobine coïncide avec la fréquence de résonance de précession gyromagnétique d'un noyau atomique d'un échantillon à observer, par exemple autour de 42 MHz/T en IRM, ce qui correspond à la fréquence de résonance des atomes d'hydrogène.

De préférence, la longueur d'un segment est par exemple inférieure ou égale à $\lambda/8$, de préférence inférieure ou égale à $\lambda/10$, où λ est la longueur d'onde d'un signal RMN à détecter.

L'invention a encore pour objet une sonde RMN ou IRM comportant au moins une bobine selon l'invention telle que décrite ci-dessus, et une source de champ magnétique statique homogène B_0 pour la polarisation des spins du noyau atomique de l'échantillon à observer, l'intensité de champ magnétique statique homogène B_0 étant de préférence comprise entre 1mT et 20T.

La sonde RMN ou IRM peut comporter au moins deux bobines selon l'invention telles que décrites ci-dessus et un support isolant, les bobines étant disposées sur le support.

Le support peut comporter un corps à symétrie sphérique ou cylindrique, définissant une surface enveloppe sur laquelle sont disposées les bobines.

Les bobines peuvent être reliées en série ou en parallèle.

Les bobines peuvent être telles que celles du dispositif de résonance magnétique nucléaire (RMN) ou d'imagerie par résonance magnétique (IRM) selon l'invention.

L'invention a encore pour objet un procédé d'imagerie et/ou de spectrométrie
 5 par résonance magnétique nucléaire (RMN) d'un échantillon à observer, comportant la polarisation des spins des noyaux d'atomes de l'échantillon avec une source de champ magnétique statique homogène B_0 , et l'excitation et/ou la détection des spins par une source de champ magnétique radiofréquence (RF) alternatif B_1 à la fréquence de résonance de précession des noyaux, la source de champ magnétique RF alternatif B_1 comportant au moins
 10 une bobine inductive qui produit le champ magnétique RF alternatif B_1 , la ou les bobines inductives comportant chacune au moins un fil conducteur électrique et au moins un condensateur de segmentation, le fil conducteur étant divisé, suivant sa longueur, en une pluralité de segments par le ou les condensateurs de manière à ce que les longueurs de ces segments soient sensiblement identiques, le nombre de segments et la capacité des
 15 condensateurs étant choisis de façon à ce que la résonance globale de la ou des bobines coïncide avec la résonance gyromagnétique du noyau à observer.

De préférence, l'intensité de la source de champ statique B_0 est comprise entre 1mT et 20T en IRM, le noyau à observer étant de préférence le proton. Cette valeur peut être ajustée si nécessaire.

20 La source de champ magnétique RF alternatif comporte de préférence au moins deux bobines inductives, les bobines inductives s'étendant au moins partiellement suivant une surface enveloppe à symétrie cylindrique ou sphérique.

Les bobines inductives peuvent être constituées de bobines du dispositif de résonance magnétique nucléaire (RMN) ou d'imagerie par résonance magnétique (IRM)
 25 selon l'invention telle que définie en premier lieu.

L'invention a encore pour objet un procédé d'imagerie et/ou de spectrométrie par résonance magnétique nucléaire (RMN) d'un échantillon à observer, comportant la polarisation des spins de noyaux d'atomes de l'échantillon avec une source de champ magnétique statique homogène B_0 , et l'excitation et/ou la détection des spins des noyaux par
 30 une source de champ magnétique radiofréquence (RF) alternatif B_1 à la fréquence de résonance de précession des noyaux, la source de champ magnétique RF alternatif B_1

comportant un dispositif de résonance magnétique nucléaire (RMN) ou d'imagerie par résonance magnétique (IRM) selon l'invention.

L'invention pourra être mieux comprise à la lecture de la description détaillée qui suit, d'exemples de mise en œuvre non limitatifs de celle-ci, et au vu du dessin annexé, sur lequel :

- la figure 1 divulgue, de manière schématique et en perspective, un système de bobines d'un dispositif selon l'invention, ayant une surface enveloppe de géométrie sphérique,
- la figure 2 divulgue, de manière schématique, une variante d'un système de bobines d'un dispositif selon l'invention, ayant une surface enveloppe de géométrie cylindrique,
- la figure 3 est une vue en coupe suivant un plan de symétrie perpendiculaire aux premier et deuxième plans médians selon l'invention,
- les figures 4 à 6 représentent des variantes de systèmes de bobines selon l'invention,
- les figures 7 à 9 représentent, de manière schématique, des variantes de segmentation de systèmes de bobines selon l'invention, et
- les figures 10 à 12 illustrent d'autres variantes de réalisation selon l'invention.

Le système 1 de bobines illustré à la figure 1 comporte deux paires de bobines 10 et 20 ayant chacune des portions opposées 11 et 21. Ces bobines 10 et 20 sont de forme circulaire et s'étendent généralement suivant une surface enveloppe sphérique Z.

Les bobines 10, 20 sont disposées de manière symétrique par rapport à un premier plan médian M de la surface enveloppe E, qui contient un axe de symétrie Y de la surface enveloppe. Les bobines 10, 20 ont des plans associés P_1 et P_2 définis par des portions opposées 11, 21 des bobines 10, 20 qui sont parallèles au premier plan médian M. Les portions opposées 11, 21 en arc de cercle d'une paire de bobines 10, 20 sont disposées de manière symétrique par rapport à un deuxième plan médian N contenant l'axe de symétrie Y et perpendiculaire au premier plan médian M.

Dans la variante illustrée à la figure 2, le système 1 comporte deux paires de bobines 10 et 20. Ces dernières comportent chacune deux portions opposées 11 et 21 rectilignes s'étendant suivant une surface enveloppe cylindrique S. Les portions opposées

11, 21 des bobines 10 et 20 d'une même paire de bobines ont la même longueur selon l'axe de symétrie Y de la surface enveloppe E. Dans chacune des bobines 10 et 20 d'une même paire de bobines, les portions opposées 11, 21 sont reliées par une portion courbe 17, 27 à une même hauteur selon l'axe de symétrie Y. Les portions opposées 11 et 21 des bobines 10 et 20 de différentes paires sont reliées à des hauteurs différentes. Les portions courbes 17 et 27 s'étendent suivant la surface enveloppe cylindrique.

La répartition des portions opposées 11 et 21 des bobines selon les figures 1 et 2 est illustrée sur la figure 3, qui est une vue dans un plan de symétrie perpendiculaire à l'axe de symétrie Y de la surface enveloppe E.

Les portions opposées 11 et 21 sont disposées suivant un cercle Q de rayon R où R est égal au rayon Rs de la surface enveloppe S sphérique de la figure 1 ou au rayon Rc de la surface enveloppe S cylindrique de la figure 2.

Une intersection I du premier plan médian M avec le cercle Q forme, sur le cercle, un angle θ_1 avec les bobines 10 de la première paire de bobines Q et un angle θ_2 avec les bobines 20 de la deuxième paire de bobines.

Les angles θ_1 et θ_2 sont des solutions du système d'équations Eq.4, qui s'écrit, d'après le système d'équation Eq.2 et avec N=2, de la manière suivante

$$\begin{aligned}\sum_{p=1}^2(I_p \cos(3\theta_p)) &= 0 \\ \sum_{p=1}^2(I_p \cos(5\theta_p)) &= 0 \\ \sum_{p=1}^2(I_p \cos(7\theta_p)) &= 0\end{aligned}\quad (\text{Eq.4})$$

La figure 4 illustre une variante d'un dispositif comportant 3 paires de bobines 10, 20 et 30, configurées pour être utilisées en régime statique. Une condition selon l'équations 3 est de plus ajoutée au système d'équations selon l'équation 2 pour déterminer la répartition des bobines.

Chaque bobine comporte N_t spires. Pour un champ objectif de 8mT, le système d'équations 5 analogue à au système d'équations 2bis avec n=3 s'écrit par exemple :

$$\begin{aligned}\frac{N_t \mu_0}{R} (I_1 \cos^2(\theta_1) + I_2 \cos^2(\theta_2) + I_3 \cos^2(\theta_3)) &= 8mT \\ I_1 \cos(3\theta_1) + I_2 \cos(3\theta_2) + I_3 \cos(3\theta_3) &= 0 \\ I_1 \cos(5\theta_1) + I_2 \cos(5\theta_2) + I_3 \cos(5\theta_3) &= 0 \\ I_1 \cos(7\theta_1) + I_2 \cos(7\theta_2) + I_3 \cos(7\theta_3) &= 0 \\ I_1 \cos(9\theta_1) + I_2 \cos(9\theta_2) + I_3 \cos(9\theta_3) &= 0\end{aligned}\quad (\text{Eq.5})$$

$$I_1 \cos(11\theta_1) + I_2 \cos(11\theta_2) + I_3 \cos(11\theta_3) = 0$$

La solution de ce jeu d'équations, résolu au moyen d'un algorithme de minimisation, conduit à : $I_1=1.305A$, $I_2=1.0465A$, $I_3=0.5808$, $\theta_1=0.2044$, $\theta_2=0.6732$, $\theta_3=1.120$.

5 Cette solution favorise une homogénéité à 1% sur 80% du diamètre de la surface enveloppe tout en répartissant les pertes par effet Joule sur les différentes bobines.

Dans la variante de la figure 5, le système 1 de bobines comporte 2 paires de bobines 10, 20 s'étendant suivant une surface enveloppe sphérique E de rayon $R = 100\text{mm}$. Chacune bobine 10, 20 comporte 320 spires. Les bobines formant une paire de bobines sont reliées en parallèle et chaque paire de bobines est alimentée indépendamment pour pouvoir
10 ajuster l'homogénéisation du champ. Le système permet une homogénéité meilleure que 300ppm dans un volume de 1cm^3 .

Dans la variante de la figure 6, la système 1 de bobines comporte 2 paires de bobines mono-spires 10, 20 reliées en série s'étendant suivant une surface enveloppe cylindrique E. Dans ce mode de réalisation, les portions opposées 11 des bobines 10 de la
15 première paire de bobine et les portions opposées 21 des bobines 20 de la deuxième paire ont une même longueur selon l'axe de symétrie Y de la surface enveloppe E. Les portions opposées 11 et 21 des bobines 10 et 20 de différentes paires sont reliées à une même hauteur.

La variante de système 1 illustrée à la figure 7 est relié à un circuit 51 d'accord et d'adaptation. Dans l'exemple illustré, le circuit d'accord et d'adaptation 51 comporte un
20 condensateur 52 monté en série avec le système 1 de bobines et deux condensateurs 53, 54 montés en parallèle avec les bobines 10, 20.

D'autres types de circuits d'accord et d'adaptation 51, par exemple tels que décrits dans les publication Mispelter et al. peuvent être utilisés.

Toutes les bobines 10, 20 du système 1 peuvent être reliées en parallèle, comme
25 illustré dans la variante de la figure 7.

Dans une variante illustrée à la figure 8, toutes les bobines 10, 20 du système 1 sont reliées en série, comme illustré.

Dans la variante de la figure 9, les bobines 11, 20 sont reliées en série entre elles par des portions intermédiaires 18, 28.

30 Dans les modes de réalisation illustrés aux figures 7 à 9, le système de bobines 11, 22 est divisé en une pluralité de segments 19, 29 par des condensateurs de segmentation 46.

De préférence, les condensateurs 46 sont disposés de manière à ce que les segments 19, 29 aient sensiblement la même longueur L_b lorsque les bobines 10, 20 sont reliées en série par leurs extrémités. Dans le cas où les bobines comportent chacune une pluralité de spires, un segment 19, 29 peut également comporter plusieurs spires et/ou des conducteurs appartenant aux spires des différentes bobines.

Lorsque les bobines 10, 20 sont reliées en parallèle, les condensateurs 46 sont de préférence choisis et/ou disposés de manière à ce que les courants dans chacune des bobines 10, 20 soient identiques ou vérifient la relation $Z_n i_n = Z_i i_i$.

Dans la variante illustrée à la figure 8, le nombre H_s de condensateurs de segmentation 46 est égal à 8. De préférence, tous les condensateurs de segmentation 46 présentent la même capacité. Dans ce cas, indépendamment de la manière dont les bobines sont associées, la résonance globale ω_0 de la sonde ainsi obtenue sera proche de $1/\sqrt{L \cdot C_s/8}$, où C_s est la capacité d'un condensateur de segmentation 46 et L est l'inductance du système. Les valeurs de C_s sont choisies de manière à faire coïncider la résonance globale ω_0 de la sonde avec la résonance gyromagnétique du noyau à observer.

Grâce à la présence des condensateurs de segmentation 46, les sondes RMN ou IRM peuvent être utilisées en basse fréquence mais également en haute fréquence.

Un système de bobines analogue à celui de la figure 7 peut être réalisé en disposant les bobines 10, 20 suivant une surface enveloppe cylindrique, telle qu'illustrée à la figure 10.

Le système est une sonde inductive comportant trois paires de bobines 10, 20, 30 disposées sur un support isolant 67 de forme cylindrique. Les bobines 10, 20, 30 sont reliées en parallèle à leur extrémité. La sonde comporte par exemple deux parties reliées de manière articulée via une génératrice du support 67.

Ce système, lorsqu'utilisé comme sonde RMN portable avec une résonance en basse fréquence jusqu'à 330kHz, a permis d'améliorer le SNR d'un facteur 2 par rapport à une bobine de type « *saddle-coil* » utilisée dans les mêmes conditions, c'est-à-dire avec le même champ statique principal B_0 , le même amplificateur bas bruit, le même échantillon, et la même séquence d'acquisition.

Dans l'exemple de la figure 11, la sonde comporte deux paires de bobines mono-spire en série, disposées sur un support isolant cylindrique 67. Dans l'exemple de la figure 12, le support comporte deux paires de bobines mono-spire en parallèle.

La sonde comporte une base portant le support isolant et comportant un logement pour recevoir le circuit d'accord et d'adaptation 51.

Dans le cas de la sonde de la figure 11 utilisée pour l'observation du proton dans un champ de 9.4T, les résultats expérimentaux ont démontré à la fois une amélioration de
5 l'homogénéité du champ et du SNR de près de 30%.

Dans un mode de réalisation, la sonde peut être réalisée pour être « clipsable ». Le support isolant 67 comporte deux demi-coques reliées de manière pivotante autour d'un axe de rotation parallèle à l'axe du cylindre, de façon à permettre l'ouverture du support autour de l'axe de rotation pour l'introduction d'un échantillon à observer dans l'espace
10 défini par le support 67.

L'invention n'est pas limitée aux modes de réalisation décrits.

Par exemple, les bobines du système de bobines peuvent être associées selon d'autres combinaisons.

REVENDICATIONS

1. Dispositif de résonance magnétique nucléaire (RMN) ou d'imagerie par résonance magnétique (IRM), comportant un système de bobines (1) comportant N paires de bobines (10, 20, 30), où N est un entier supérieur à 1, de préférence supérieur à 2, ces bobines (10, 20, 30) s'étendant, au moins partiellement, selon une surface enveloppe (E) du système de bobines, la surface enveloppe (E) étant à symétrie de révolution, chaque bobine (10, 20, 30) comportant au moins deux portions opposées (11, 21) définissant un plan associé (P1, P2) parallèle à un premier plan médian (M) de la surface enveloppe (E) contenant un axe de symétrie (Y) de la surface enveloppe (E), les portions opposées (11, 21) des bobines (10, 20, 30) d'une même paire étant disposées de manière symétrique par rapport au premier plan médian (M), les portions opposées (11, 21) d'une bobine (10, 20, 30) étant disposées de manière symétrique par rapport à un deuxième plan médian (N) contenant ledit axe de symétrie (Y) et perpendiculaire au premier plan médian (M), système dans lequel lorsqu'observé en coupe dans un plan de symétrie (S) de la surface enveloppe (E) perpendiculaire audit axe de symétrie (S), les portions opposées (11, 21) des bobines (10, 20, 30) sont disposées suivant un cercle (Q), la disposition des bobines (10, 20, 30) satisfaisant aux relations suivantes :
- a) dans le cas où le système comporte un nombre impair de bobines (10, 20, 30) avec une bobine centrale s'étendant suivant le premier plan médian (M)

$$I_0 + \sum_{p=1}^N (I_p \cos(3\theta_p)) = 0 \quad (k = 2)$$

...

$$I_0 + \sum_{p=1}^N (I_p \cos((2j-1)\theta_p)) = 0 \quad (k = j)$$

...

$$I_0 + \sum_{p=1}^N (I_p \cos((4N+1)\theta_p)) = 0 \quad (k = 2N + 1)$$

où θ_p est l'angle, sur le cercle (Q), entre l'une des portions opposées (11, 12) d'une bobine de la p^{ème} paire de bobines (10, 20, 30) et l'une des intersections

(M₁, M₂) du premier plan médian (M) avec le cercle (Q), p étant un entier entre 1 et N, I_p = N_pi_p étant le produit du nombre de spires N_p d'une bobine (10, 20, 30) de la p^{ème} paire de bobines et de l'amplitude de l'intensité i_p du courant parcourant ces bobines (10, 20, 30), et I₀ le produit du nombre de spires de la bobine centrale et de l'amplitude de l'intensité du courant parcourant la bobine centrale;

b) dans le cas où le système comporte un nombre pair de bobines,

$$\sum_{p=1}^N (I_p \cos(3\theta_p)) = 0 \quad (k = 2)$$

...

$$\sum_{p=1}^N (I_p \cos((2j - 1)\theta_p)) = 0 \quad (k = j)$$

...

$$\sum_{p=1}^N (I_p \cos((4N - 1)\theta_p)) = 0 \quad (k = 2N),$$

où θ_p est l'angle, sur le cercle, entre l'une des portions opposées (11, 12) d'une bobine (10, 20, 30) de la p^{ème} paire de bobines et l'une des intersections (M₁, M₂) du premier plan médian (M) avec le cercle (Q), p étant un entier entre 1 et N, I_p le produit du nombre de spires d'une bobine (10, 20, 30) de la p^{ème} paire de bobines et de l'amplitude de l'intensité du courant parcourant ces bobines (10, 20, 30).

2. Dispositif selon la revendication 1, chaque bobine (10, 20, 30) comportant des portions (11, 21) opposées s'étendant suivant une surface enveloppe (E) sphérique, les bobines (10, 20, 30) étant de préférence des bobines circulaires.
3. Dispositif selon la revendication 1, chaque bobine (10, 20, 30) comportant deux portions opposées (11, 21) rectilignes s'étendant suivant une surface enveloppe (E) cylindrique et parallèle à son axe (Y), et au moins une section courbe (17, 27) reliant les portions opposées (11, 21).
4. Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, les bobines (10, 20, 30) étant reliées en série ou en parallèle.
5. Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, deux bobines d'une même paire de bobines (10, 20, 30) comportant un même nombre de spires.
6. Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, les bobines (10, 20, 30) étant mono-spices.

7. Dispositif selon la revendication 2, les courants étant continus, les angles θ_p et les produits I_p du nombre de spires d'une bobine (10, 20, 30) de la $p^{\text{ème}}$ paire de bobines et de l'amplitude de l'intensité du courant parcourant ces bobines (10, 20, 30) étant solutions de l'équation

$$\frac{\mu_0}{R} \sum_{p=1}^N I_p \cos^2(\theta_p) = B_{obj}$$

où R le rayon de la surface enveloppe (E) sphérique, μ_0 perméabilité magnétique du vide et B_{obj} est l'amplitude du champ magnétique à générer.

8. Dispositif selon la revendication 7, étant configuré pour être utilisé comme sonde RMN ou IRM, les angles θ_n étant choisis de manière à maximiser l'expression $\sum_{p=1}^N I_p \cos^2(\theta_p)$.

9. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 8, étant configuré pour être utilisé comme sonde RMN ou IRM en haute fréquence, le système de bobines étant de préférence divisé, le long de la longueur du et des fils conducteurs constituant les bobines (10, 20), en une pluralité de segments (19, 29), les segments (19, 29) étant de préférence de longueur sensiblement identique au sein d'une même bobine (10, 20, 30) avec une tolérance de 10% au sein d'une bobine, où N_b est un entier supérieur à 1, et reliés entre eux par des condensateurs de segmentation (46) de façon à ce que la résonance globale (ω_0) du système coïncide avec la résonance gyromagnétique d'un noyau d'un échantillon à observer.

10. Dispositif selon la revendication précédente, la longueur (L_b) d'un segment (19, 29) étant de préférence inférieure à $\lambda/8$, encore mieux inférieure ou égale à $\lambda/10$, où λ est la longueur d'onde d'un signal RMN à détecter.

11. Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, le système étant configuré pour être utilisé comme sonde RMN ou IRM et les bobines (10, 20, 30) étant associées à un circuit d'accord et d'adaptation (51).

12. Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, les bobines (10, 20, 30) étant associées en parallèle et $Z_{ni} = Z_{ji}$ où Z_i et Z_n sont respectivement l'impédance d'une bobine de la $i^{\text{ème}}$ paire de bobines et de la $n^{\text{ème}}$ paire de bobines, i et n étant des entiers quelconques entre 1 et N.

13. Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, les bobines (10, 20, 30) étant alimentées avec des courants de même intensité en amplitude efficace.
- 5 14. Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, le système étant configuré pour être associé à un amplificateur bas bruit haute impédance.
15. Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, le système étant configuré pour permettre l'introduction d'un échantillon, au moins partiellement, à l'intérieur du volume délimité par la surface enveloppe (E).
- 10 16. Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, le système étant une sonde volumique et étant associée à des sondes de surface.
17. Sonde RMN ou IRM comportant un dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 16, configuré pour être utilisé comme sonde d'excitation des spins et/ou de détection des spins.
- 15 18. Sonde RMN ou IRM selon la revendication précédente, comportant des dispositifs selon l'une quelconque des revendications 1 à 16, combinés en quadrature.
- 20 19. Procédé d'imagerie et/ou de spectrométrie par résonance magnétique nucléaire (RMN) d'un échantillon à observer, comportant la polarisation des spins de noyaux d'atomes de l'échantillon avec une source de champ magnétique statique homogène (B_0), et l'excitation et/ou la détection des spins des noyaux par une source de champ magnétique radiofréquence (RF) alternatif (B_1) à la fréquence de résonance de précession des noyaux, la source de champ magnétique RF alternatif (B_1) comportant un dispositif de résonance magnétique nucléaire (RMN) ou d'imagerie par résonance magnétique (IRM) selon l'une quelconque

25 des revendications 1 à 18.
20. Procédé selon la revendication précédente, l'intensité de la source de champ statique étant comprise entre 1mT et 20T, le noyau à observer étant le proton.
- 30 21. Procédé selon la revendication 19 ou 20, la source de champ magnétique RF alternatif comportant au moins deux bobines inductives, les bobines inductives s'étendant au moins partiellement suivant une surface enveloppe à symétrie cylindrique ou sphérique.

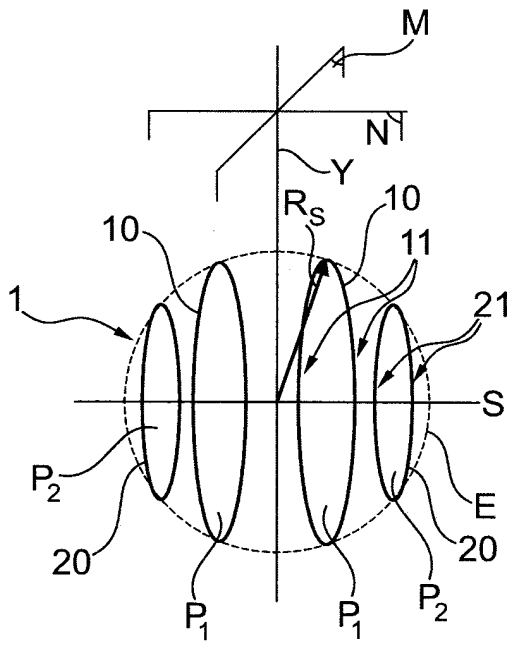


Fig. 1

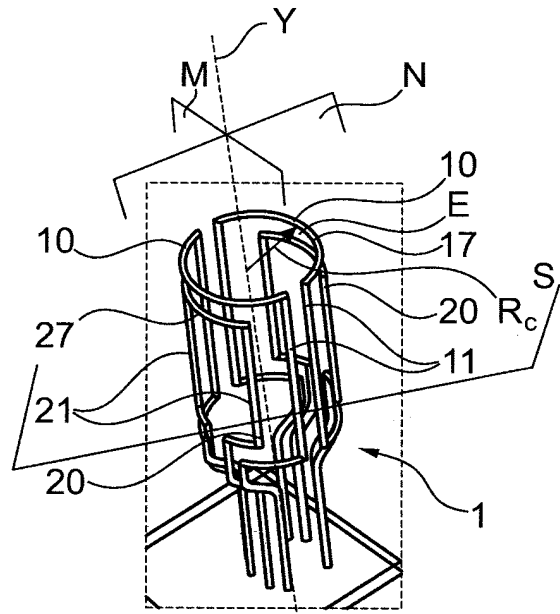


Fig. 2

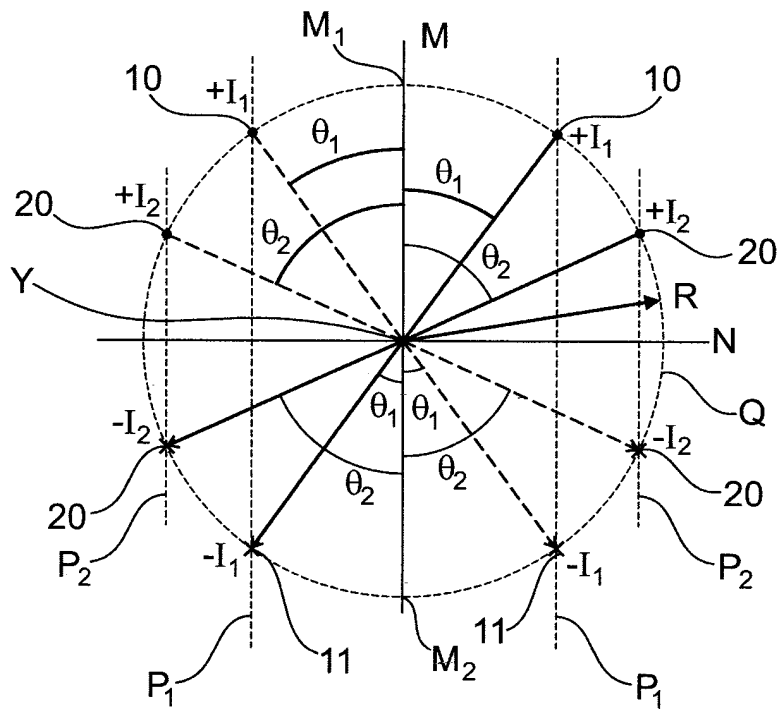


Fig. 3

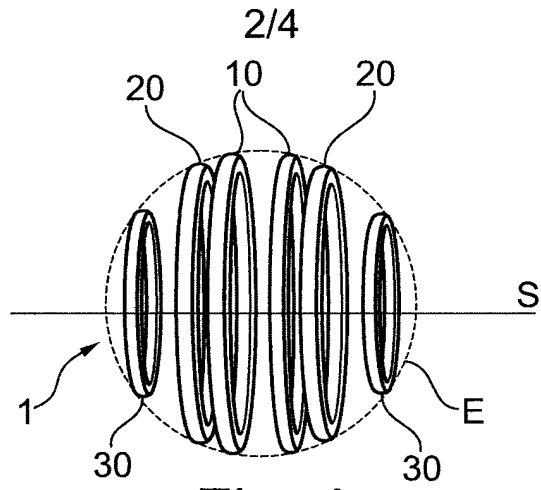


Fig. 4

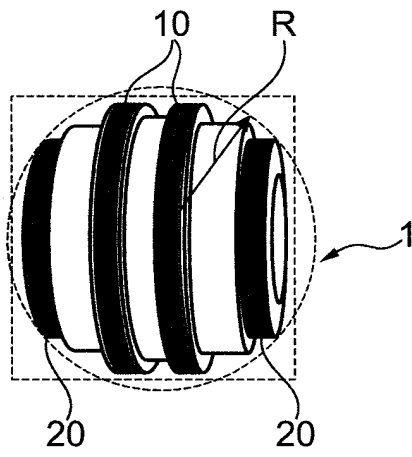


Fig. 5

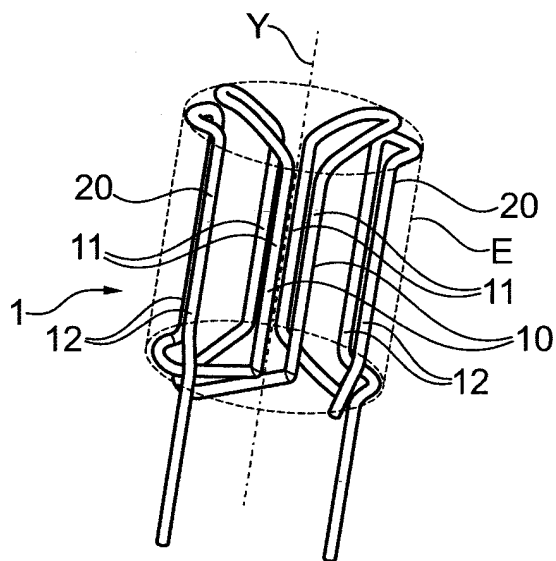


Fig. 6

3/4

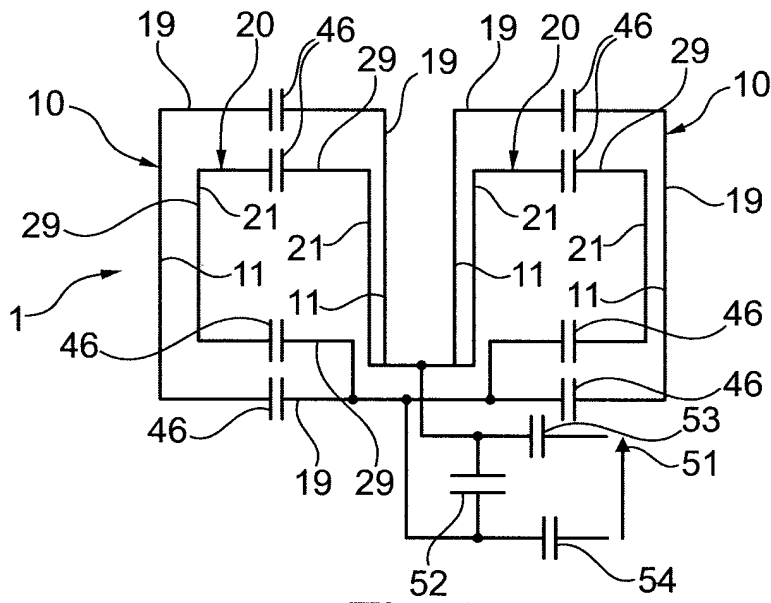


Fig. 7

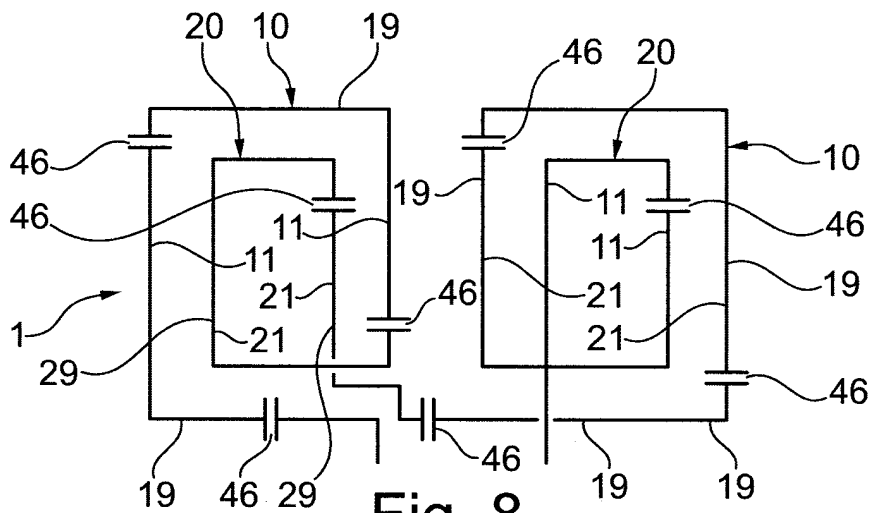


Fig. 8

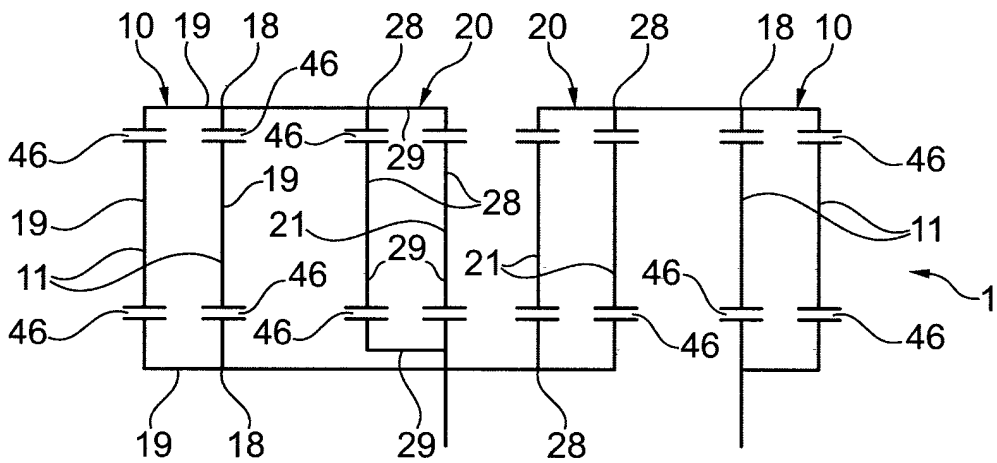


Fig. 9

4/4

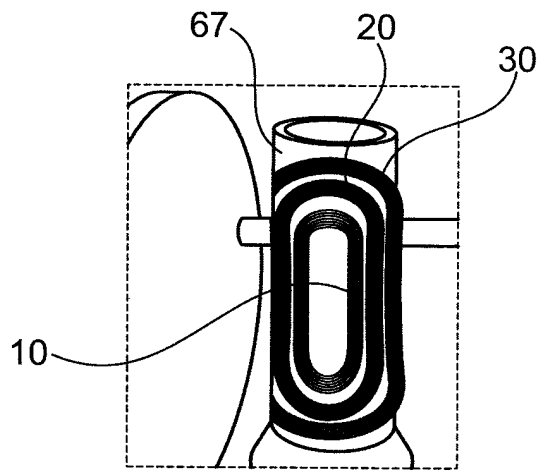


Fig. 10

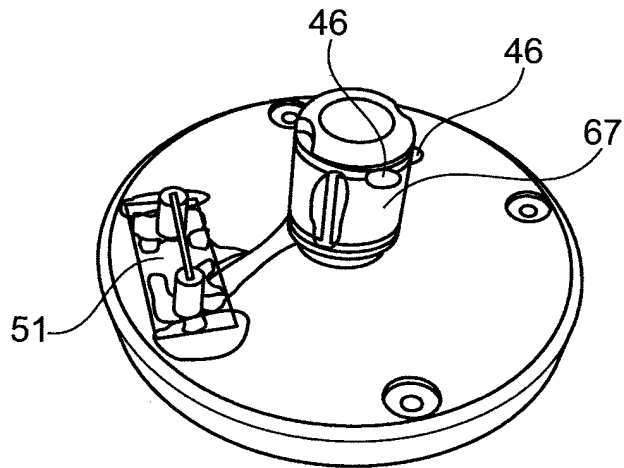


Fig. 11

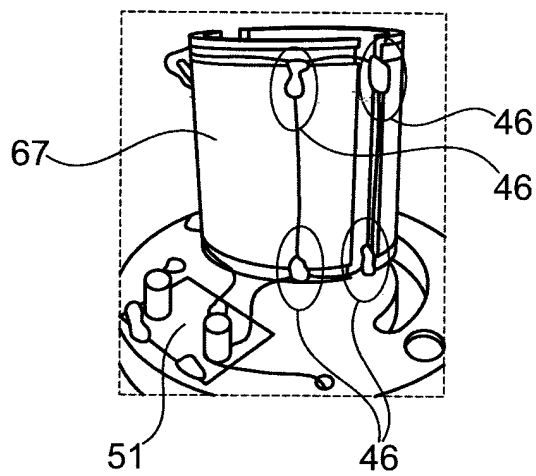


Fig. 12



INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ
INDUSTRIELLE

RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE

établi sur la base des dernières revendications
déposées avant le commencement de la recherche

N° d'enregistrement
national

FA 853215
FR 1850644

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
X	CHRISTOPHE COILLOT ET AL: "The magnetic field homogeneity of coils by means of the space harmonics suppression of the current density distribution", JOURNAL OF SENSORS AND SENSOR SYSTEMS, vol. 5, no. 2, 1 janvier 2016 (2016-01-01), pages 401-408, XP55341440, DOI: 10.5194/jsss-5-401-2016 * Sections 1, 5, 6 *	1-6,9-21	G01R33/38 G01R33/48 A61B5/055
A,D	HOULT D I ET AL: "A HIGH-SENSITIVITY, HIGH-B1 HOMOGENEITY PROBE FOR QUANTITATION OF METABOLITES", MAGNETIC RESONANCE IN MEDICINE, JOHN WILEY & SONS, INC, US, vol. 16, no. 3, 1 décembre 1990 (1990-12-01), pages 411-417, XP000145556, ISSN: 0740-3194 * Section "Basic Design" *	1-21	
A	BEN G LAWRENCE* ET AL: "A Time-Harmonic Inverse Methodology for the Design of RF Coils in MRI", IEEE TRANSACTIONS ON BIOMEDICAL ENGINEERING, IEEE SERVICE CENTER, PISCATAWAY, NJ, USA, vol. 49, no. 1, 1 janvier 2002 (2002-01-01), XP011007190, ISSN: 0018-9294 * Section II *	1-21	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC) G01R
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
29 novembre 2018		Streif, Jörg Ulrich	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS		T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure. D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant	
X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire			

1
EPO FORM 1503 12.99 (P04C14)

**RAPPORT DE RECHERCHE
PRÉLIMINAIRE**

établi sur la base des dernières revendications
déposées avant le commencement de la recherche

N° d'enregistrement
national

FA 853215
FR 1850644

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
A	BAI Y ET AL: "Target Field Approach for Spherical Coordinates", IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, IEEE SERVICE CENTER, LOS ALAMITOS, CA, US, vol. 14, no. 2, 1 juin 2004 (2004-06-01), pages 1317-1321, XP011117590, ISSN: 1051-8223, DOI: 10.1109/TASC.2004.830565 * Sections II, III *	1-21	
A	ROMEO F ET AL: "MAGNET FIELD PROFILING: ANALYSIS AND CORRECTING COIL DESIGN", MAGNETIC RESONANCE IN MEDIC, JOHN WILEY & SONS, INC, US, vol. 1, no. 1, 1 janvier 1984 (1984-01-01), pages 44-65, XP009021071, ISSN: 0740-3194 * le document en entier *	1-21	
T	RAHIMA SIDI-BOULENOUAR ET AL: "Homogenous static magnetic field coils dedicated to portable nuclear magnetic resonance for agronomic studies", JOURNAL OF SENSORS AND SENSOR SYSTEMS, vol. 7, no. 1, 4 avril 2018 (2018-04-04), pages 227-234, XP055528441, DOI: 10.5194/jsss-7-227-2018 * le document en entier *	1-21	
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC)
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
29 novembre 2018		Streif, Jörg Ulrich	
<p>CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS</p> <p>X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire</p> <p>T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure. D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant</p>			